

石油暨石化產業科技學術合作

八十八年度期中報告

製程安全評估技術之開發(II)—子計畫三：高壓液化氣儲槽火災爆炸控制策略之研究

計畫編號：NSC 88-CPC-E-032-015

執行期間：88 年 4 月 1 日至 88 年 12 月 31 日

委託單位：中國石油股份有限公司

計畫主持人：陳錫仁

共同主持人：韓光榮

執行單位：淡江大學化工研究所

中華民國 88 年 8 月 31 日

一、計畫目標

高壓液化氣如液化石油氣、氨、乙烯、環氧乙烷、氯化氬等都是化學工業利用價值甚高的產品。然而，高壓液化氣一直都是許多化學災害的來源，其中一種稱之為 UVCE 係外洩之可燃性氣體隨大氣擴散經點燃後引起「蒸氣雲爆炸」；另外一種稱之為「液體沸騰氣體膨脹爆炸」(BLEVE)，係指液體溫度大於大氣壓沸點溫度時，突然從封閉容器中釋放出來的一種物理現象。由於壓力突然釋放而使部分的液體氣化產生具爆炸性的蒸氣雲。大部分的 BLEVE 與可燃性液體有關，且大部分的 BLEVE 一旦被周圍的火源點燃常形成火球。

高壓液化氣儲槽受火災侵襲時的安全評估 需要完整的熱質傳之程序分析才能正確預測槽體的溫度或壓力，並從模擬的數據中歸納出 BLEVE 之形成。此計畫之目的主要有兩個：首先建立高壓液化氣儲槽火災爆炸之熱/壓力效應之數學模式；此外，由於 BLEVE 現象引發之熱輻射風險分析亦一併提出。其次探討控制對策，包括撒水冷卻、安全距離、壓力釋放裝置、防火堤等等，以確保高壓液化氣槽區之安全。

二、研究方法及步驟

液化石油氣(LPG)是一種利用價值甚高的產品，主要成分為丙烷、丁烯等。除了廣泛當成燃料外也常常當作製造石化基本原料(乙烯、丙烯等)的裂解進料。

在 20°C 丙烷液化的壓力約 8 kg/cm²、丁烷約有 2~3 kg/cm² 的蒸氣壓。比起其他燃料液化石油氣的發熱量相當高(約 20,000 ~ 30,000 kcal/Nm³)、輸送及儲存簡便，燃燒後硫等公害成分極少。

著火濃度上、下限：丙烷之著火濃度下限(Low Flammability Limit, 簡稱 LFL)與著火濃度上限(Upper Flammability Limit, 簡稱 UFL)分別為 2.1%及 9.5%，丁烷之著火濃度界限為 1.6%至 8.4%，均屬「可燃性氣體」，丙烷與丁烷之物質安全資料表(MSDS)可由網際網路 <http://192.192.46.66//> 取得，LPG 本身之物質安全資料表可由中油公司取得。

閃火點：液態燃料必須吸收熱能揮發成氣體後，才會著火燃燒。閃火點(Flash Point)是決定液態物質危害性的重要物理特性之一。氣態燃料的著火濃度範圍，也會受到惰性氣體的加入而改變，由於惰性氣體的存在會降低燃料與空氣接觸及混合的程度，因而抑止燃燒反應的發生，惰性氣體的加入比例越高，著火濃度範圍越窄。

一立方米的液化石油氣可揮發成 245 至 275 立方米的蒸氣，液化石油氣熱值很高，是甲烷的 2.5 至 3 倍，因此液化石油氣很小的儲存體積即有很高的儲存能量。也因此液化石油氣的製造與儲運過程需格外的謹慎小心，現有「高壓氣體勞工安全規則」雖有安全上各種規定及基準，然有些技術並不完整且無強制性。此外，國內因地狹人稠而導致場內製造區與儲槽區佈置緊密及安全距離鋪普遍不足的現況，如何訂定一個適用於國內特殊情況的標準，可說是相當重要的課題。

由於國內的液化石油氣在工業及家庭中已被廣泛的使用，因此液化石油氣灌裝場的安全設施，必須格外的重視以防發生嚴重的事故。以下是發生於民國 87 年 2 月 27 日，高雄林園北誼興業液化石油氣灌裝場槽車氣爆案，此事故造成 4 人死亡 44 人輕重傷，以下是北誼興業事故的分析圖例：

在工廠裡，一輛液化石油氣之氣槽車正將液化石油氣由

球槽中灌裝於槽車內(如圖 1)。

- 一、在此操作過程中，車內司機突然將槽車開走，因而將管線扯斷發生外洩，液化石油氣之蒸氣並漫延至槽車(圖 2)。
- 二、外洩之液化石油氣接觸到燃源，而引火燃燒(圖 3)。
- 三、槽車內的液體被槽外的火燄加熱，使得槽車內蒸氣壓增加。而後槽內之壓力安全閥打開，液化石油氣由安全閥外洩(圖 4)。
- 四、由安全閥放出來的氣體亦被點燃(圖 5)。
- 五、槽體由於受到加熱壓力上升的影響，結構繼續減弱，而後造成槽車材質的破裂。這將使得液態 LPG 快速降壓，大量的蒸氣被釋放出來並迅速引燃(圖 6)。
- 六、由燃燒中的氣體所產生的力量引起槽車進一步的破裂，然後槽車整個爆破並斷成兩截(圖 7)。

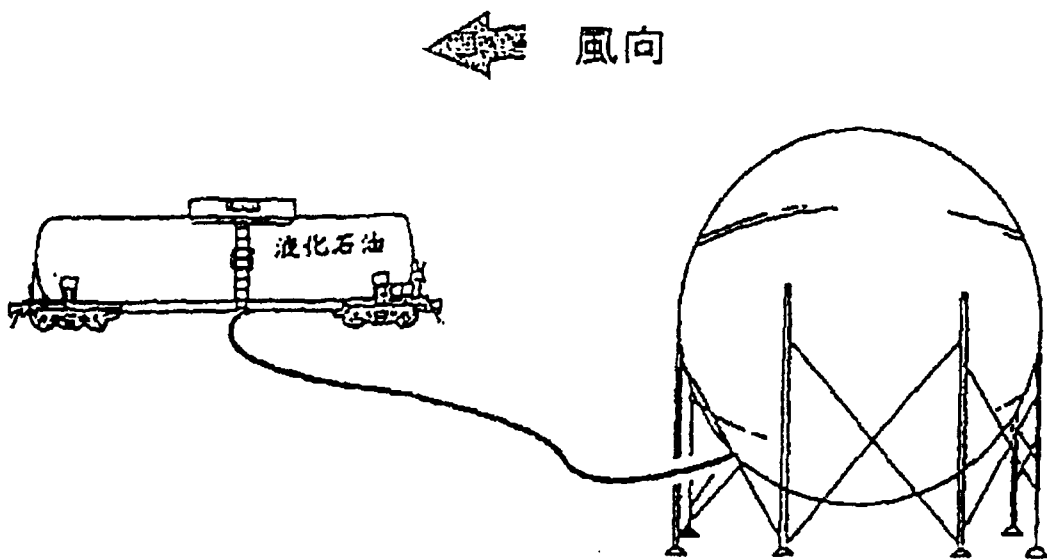


圖 1 在工廠裡，一輛液化石油氣之槽車正將液化石油氣由球槽中灌裝於槽車內

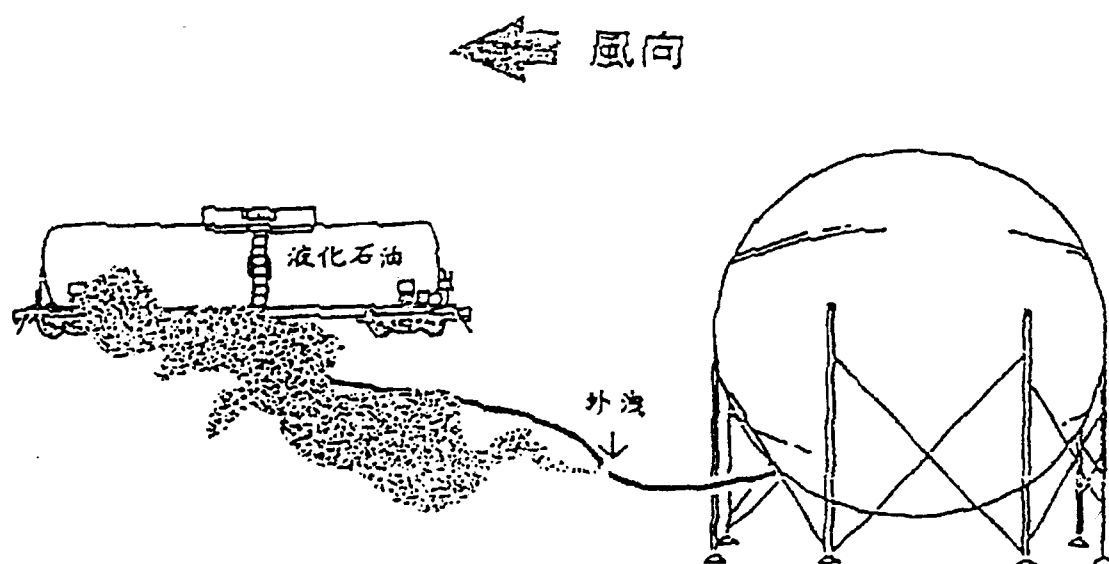


圖 2 在此操作過程中，車內司機突然將槽車開走，因而將管線扯斷發生外洩，液化石油氣之蒸氣並蔓延至槽車

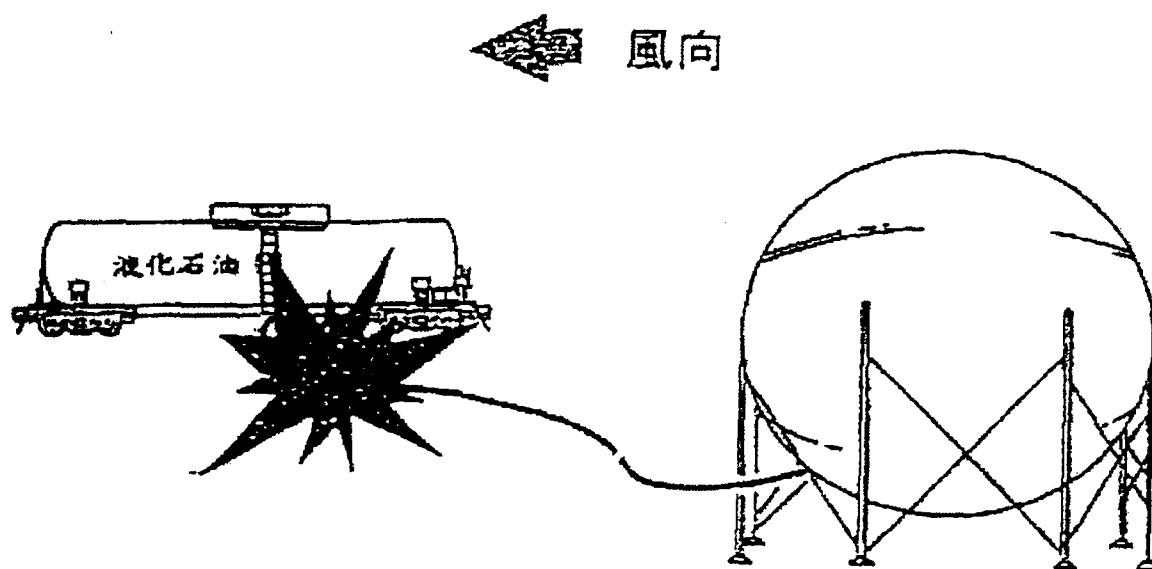


圖 3 外洩之液化石油氣接觸到燃源，引火燃燒

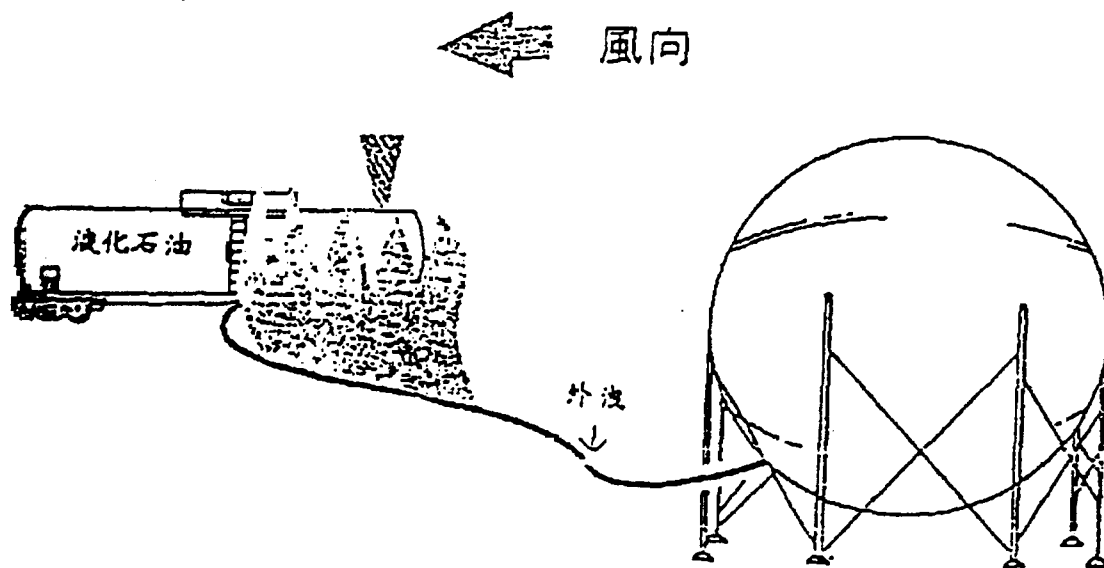


圖 4 槽車內的液體被槽外的火焰加熱，使得槽車內蒸氣壓增加。
而後槽內之壓力安全閥打開，LPG 由安全閥外洩

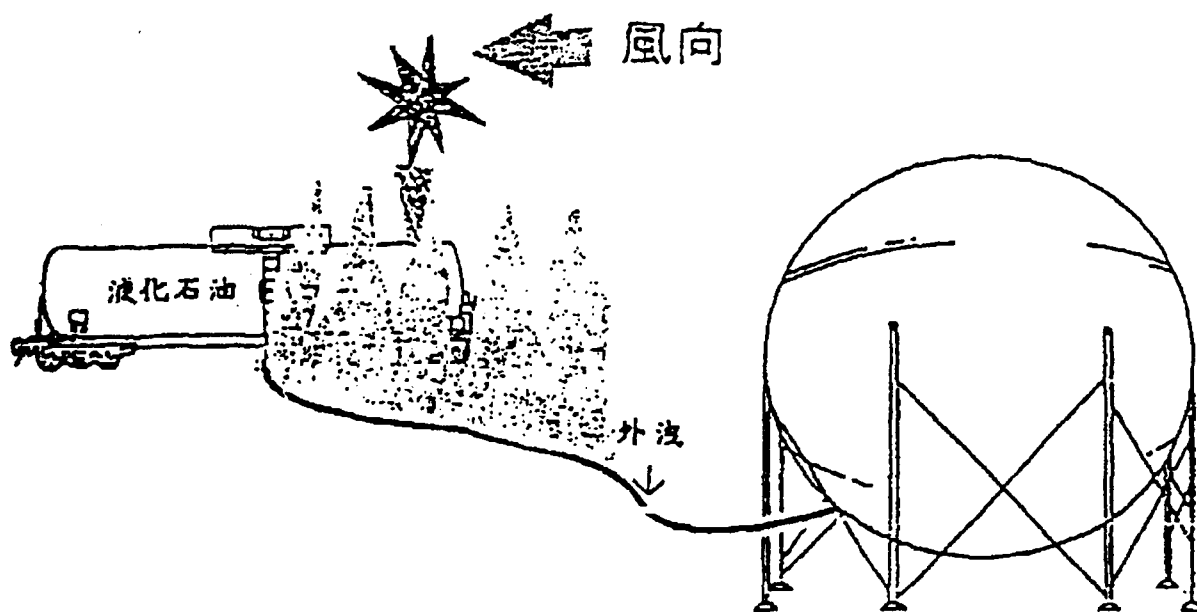


圖 5 由安全閥放出來的氣體亦被點燃

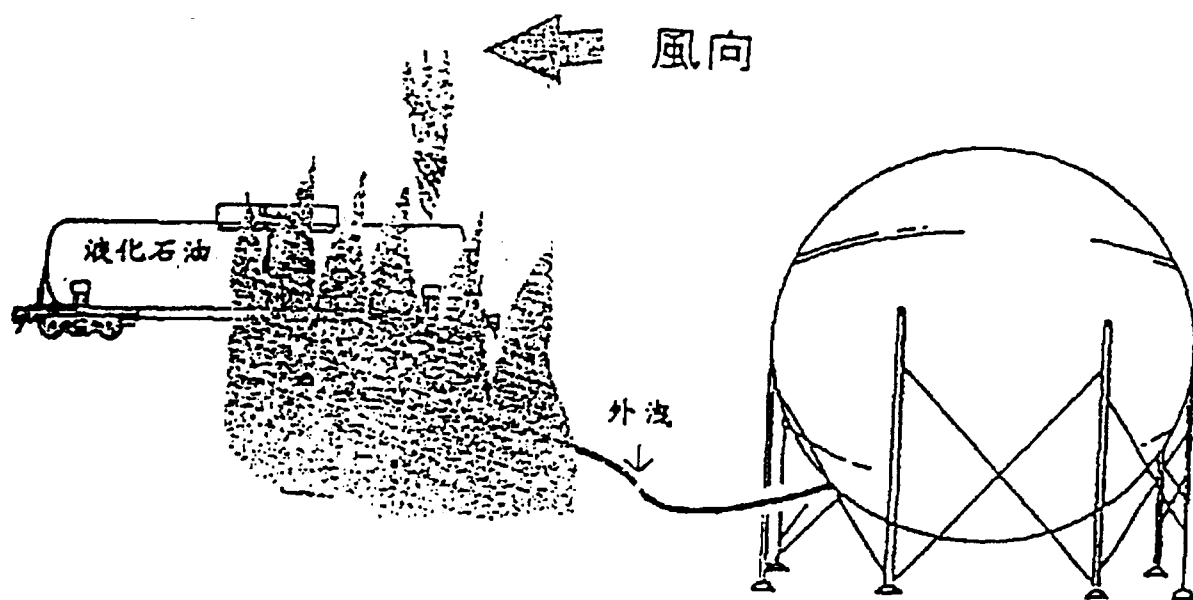


圖 6 槽內由於受到加熱壓力上升的影響，結構繼續減弱，而後造成槽車材質的破裂。這將使得液態 LPG 快速降壓，大量的蒸氣被釋放出來並迅速引燃

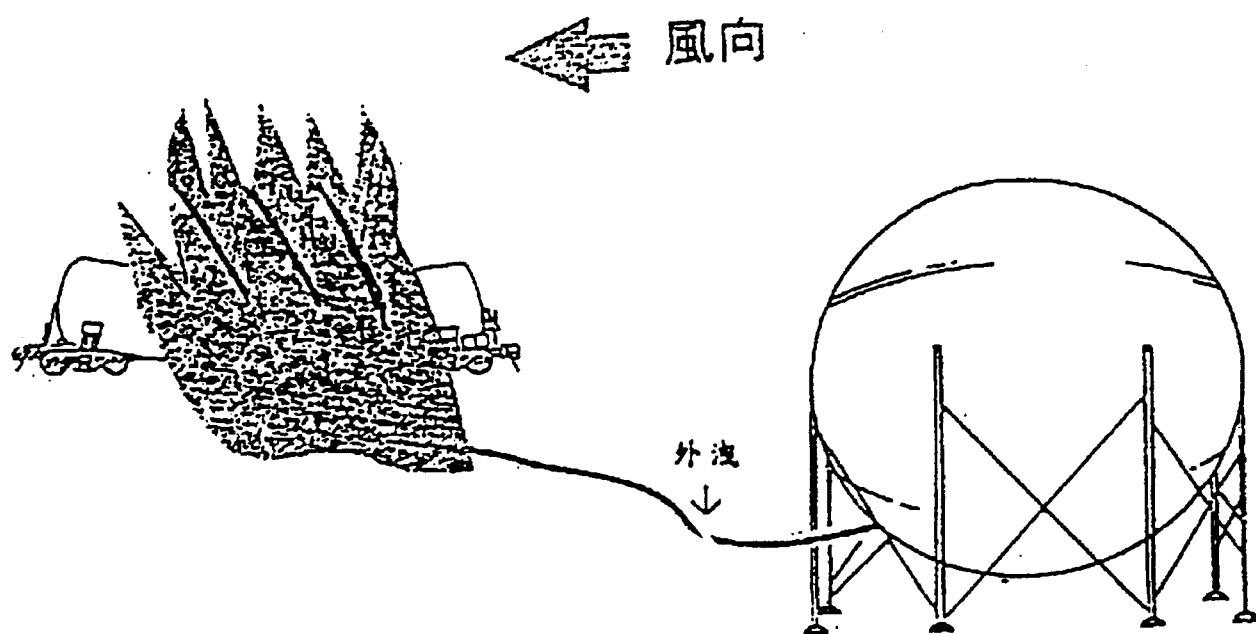


圖 7 由燃燒中的氣體所產生的力量引起槽車內近一步的破裂，然後槽車整個爆炸並斷成兩節

事故發生後依據北誼興業公開聲明之第六點，「本公司及其前身輔導會液供處等從事氣槽車灌裝作業不下一千萬次，從未發生災害，作業流程均比照勞工局備案之工作守則(包括作業及監視人員到位、在場值勤，按規定放置前後輪檔，以及消防設施及應變措施等)，此次意外絕非本公司員工作業疏忽所造成。除客戶所顧司機自己之過失外，是否氣槽車本身亦不符合法定安全裝置而造成爆炸，本公司將立即研討追究以杜絕將來可能發生之任何意外。」。此事件顯然由於灌裝場本身管理不善，於灌裝與卸收時司機必須於休息室等待，且鑰匙必須交由守衛保管，程序雖稍煩雜，但能降低重大災害的發生。

理論上計算 1 公斤的丙烷引爆有 10.1 公斤的 TNT 當量，而一公斤的丁烷引爆有 9.91 公斤的 TNT 當量。所以每一公斤 LPG 引爆約有相當於十公斤 TNT 的能量。據美國 Garrison 報告「三十年石油/石化製造業百大災害」指出約有 30% 竟與液化石油氣相關。BLEVE 一詞濫觴於解釋因過壓而造成化學反應槽破裂的災害。BLEVE 亦定義為所儲存之液體溫度大於大氣壓下之沸點造成容器嚴重的破裂。許多容器損害的形式屬於這一種類，LPG 儲槽的破裂是 BLEVE 中的一種，因發生重大災害而廣受注意。大部分的 BLEVE 常被周圍的火源點燃形成火球，火球的大小為容器體積、容器填充程度、氣體組成與槽內氣體的溫度和壓力的函數，半徑 50 公尺的火球是常見的。因為最初火球形成時，大部分的液體並未氣化與燃燒，然而在儲槽體破裂口附近持續幾分鐘激烈的燃燒結果造成猛烈的爆炸進而危害臨近的儲槽，伴隨爆炸所形成的碎片可散落至數百公尺之遙並危害臨近的社區。1926~1986 年全世界著名 BLEVE 案例可參見文獻，其中最著名的為 1984 年在墨西哥的 Mexico City 發生的 LPG 儲槽爆炸事件，此事故造成了超過 500 人死亡與 7000 人受傷，Pietersen

詳細描述整個意外事件的經過。Birk 與 Cunningham 做了一連串有關 BLEVE 現象的實驗。Birk 做了大小體積不同儲槽在明火下的試驗。幾種廣為人知的儲槽 BLEVE 防護措施包括明火的預防、槽壁之灑水冷卻、保溫材料的使用及適當的壓力釋放裝置。幾位研究人員提出了 LPG 儲槽之熱效應數學模式，但模擬的理念未盡相同。由於商業機密 Ramskill 在他的團併參數(lumped-parameter)模式省略了最重要的微分方程式，Beynon 等則採用分配參數(distributed-parameter)模式。本研究期中報告主要提出球形 LPG 儲槽 BLEVE 之熱效應模式的模擬。此外，我們亦估計 BLEVE 所引發的熱輻射致死區域，可做為評估 LPG 儲槽安全性的參考。

一般而言，高壓液化氣儲槽有兩種幾何形狀：球形儲槽與臥式儲槽，可依功能、容積等而有不同的用途。本研究針對球型槽(參考圖 8)作安全評估。假設球槽遭受太陽熱輻射與火燄之包圍，則其中有四個溫度節點需要計算，分別為受熱槽壁與蒸氣及受熱槽壁與液體接觸部份、槽內蒸氣及液體空間四個部份。

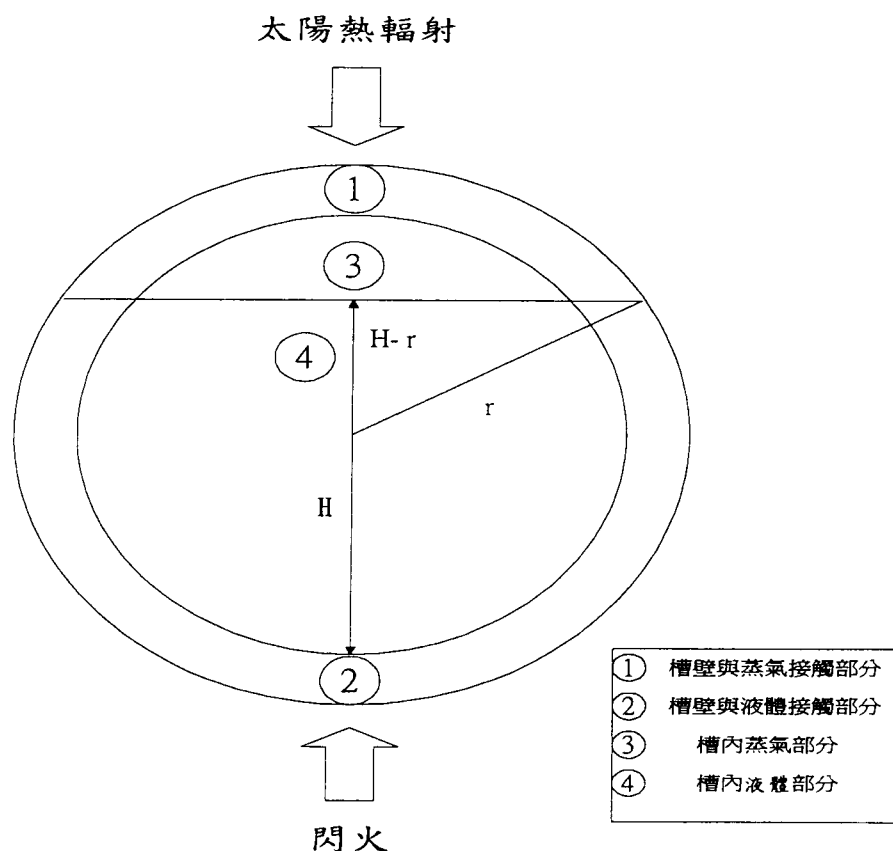


圖 8 球型槽各節點受熱之示意圖

基於以下兩個假設：(1)各節點溫度均勻分佈，(2) 槽內各部份接受均勻之熱輻射。整個系統可以幾個偶合的微分方程式描述之，藉由各節點與流體間之能量平衡可得：

$$\begin{aligned}
 (\text{熱能累積率}) &= (\text{熱能流入率}) - (\text{熱能流出率}) + (\text{熱能產生率}) \\
 \rho_w V_1 C_{pw} \frac{dT_1}{d\tau} &= h_{1a} A_1 (T_a - T_1) - h_{13} A_1 (T_1 - T_3) - h_{12} A_{12} (T_1 - T_2) \\
 &\quad + Q_s A_1 + Q_E A_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\rho_w V_2 C_{pw} \frac{dT_2}{d\tau} = h_{2a} A_2 (T_a - T_2) - h_{24} A_2 (T_2 - T_4) - h_{12} A_{12} (T_2 - T_1) + Q_s A_2 + Q_E A_2 \quad (2)$$

$$\rho_g V_g C_{pg} \frac{dT_3}{d\tau} = h_{13} A_1 (T_1 - T_3) - h_{34} A_{34} (T_3 - T_4) \quad (3)$$

$$\rho_l V_l C_{pl} \frac{dT_4}{d\tau} = h_{24} A_2 (T_2 - T_4) - h_{34} A_{34} (T_4 - T_3) \quad (4)$$

式中 T 表示溫度， τ 為時間， ρ 為密度， A 、 V 分別為面積及體積， C_p 是熱容值， h 為熱傳係數，其下標 l 、 g 分別表示液態及氣態液化石油氣，(1~4) 為四個節點之區域。

式1至2中之 Q_E 為閃火發生時，外界輸入的熱源； Q_s 則是太陽所產生的熱輻射，太陽熱輻射 Q_s 可利用 Raphael 所推導出的式子：

$$Q_s = 1.111(1 - 0.0071C_l^2)(\sin \phi_s - 0.1) \quad (5)$$

其中太陽能常數是 1.111 kW/m^2 ， C_l 是一個無因次係數，它代表天候，雲量多寡的指標（0 表示完全沒有雲的遮蔽，10 表示完全為雲遮蔽）， ϕ_s 則表示太陽光線的入射角，以水平入射為 0 度基準，此式應用必須符合 $\sin \phi_s$ 值大於 0.1，若是小於 0.1 時，太陽熱輻射可以假設其值為 0。

受熱氣體熱傳面積與受熱液體熱傳面積，分別可證明是：

$$A_1 = 2\pi r(2r - H) \quad (6)$$

與

$$A_2 = 2\pi rH \quad (7)$$

其中 $A_1 + A_2 = 4\pi r^2$ 。氣體與液體的槽壁接觸面積 A_{12} 可寫成：

$$A_{12} = 2\pi \sqrt{2rH - H^2} t \quad (8)$$

沸騰熱傳面積 A_{34} 可寫成：

$$A_{34} = \pi(2rH - H^2) \quad (9)$$

槽體內液體體積與液位高度的關係可證實如下：

$$V_\ell = \pi(rH^2 - \frac{1}{3}H^3) \quad (10)$$

其中液位高度 H 為已知，槽內液體體 V_ℓ 即可算出，其它：

$$V_1 = 2\pi r(2r - H)t, \quad V_2 = 2\pi rHt, \quad V_g = \frac{4}{3}\pi r^3 - V_\ell。$$

自然對流熱傳係數 h_{1a} 與 h_{2a} 可用：

$$Nu = 2 + 0.43(GrPr)^{1/4} \quad (11)$$

槽內流體與槽壁的熱傳係數 h_{13} 與 h_{24} 可依據公式：

$$Nu = \frac{hH}{k} = C(Ra)^n \quad (12)$$

其中， $Ra = GrPr = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\alpha\nu}$ ， $Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2}$ ， Nu 為 Nusselt 數， Ra

為 Rayleigh 數， Gr 為 Grashof 數， D 為儲槽之直徑， α 為熱擴散係數， β 為體膨脹係數， ν 為動黏度， C 、 n 為常數，隨幾何形狀的不同各有不同的數值。各區槽壁間之熱傳係數如圖9

槽壁有效熱傳係數 h_{12} 可用：

$$h = \frac{k_w}{\Delta x} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \Delta x = \left(k_w t\right)^{1/2} \left(\frac{1}{(h_{1a} + h_{13})^{1/2}} + \frac{1}{(h_{2a} + h_{24})^{1/2}} \right)。$$

最後，沸騰熱傳係數 h_{34} 可用：

$$Nu = 0.304 \frac{Ja^2}{C_{nb}^3 Pr_L^m} \quad (14)$$

式中 $J_a = \frac{C_P \ell (T_w - T_{sat})}{h_{fg}}$

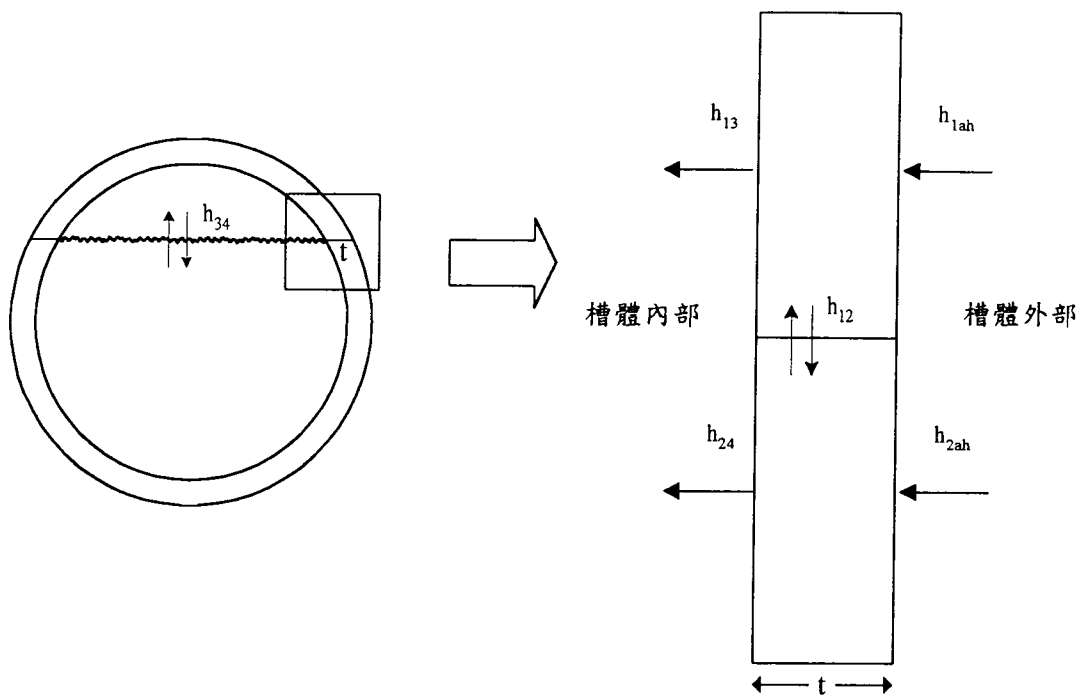


圖 9 槽壁有效熱傳係數之計算

由熱輻射所造成皮膚的傷害一般可分為：一級、二級、三級灼傷，這取決於對皮膚的損害程度而定，皮膚的構造可分為三層：表皮、真皮與皮下組織，第一級灼傷傷及皮膚表面的特徵為紅腫、乾燥與疼痛；第二級灼傷傷及表皮(厚度 0.07-0.12 mm)，其灼傷特徵為皮膚組織形成水泡狀態，亦會紅腫；第三級的灼傷延伸至真皮(厚度 1-2 mm)是毛髮髮根與神經末梢等存在的區域，灼傷的皮膚會失去知覺、乾燥與呈現白色、黃色和黑色。二級與三級灼傷會導致殘疾，亦會有傷亡的機率產生，依皮膚灼傷的面積對個人年紀大小而不同，來自於火災的熱輻射量，能量的吸收幾乎百分之百，視溫昇大小與熱滲透的深淺，多多少少會造成皮膚的灼燒。火災所形成之熱輻射量熱傳進入皮膚的數學模式可視為一維熱傳問題，熱輻射所造成之傷害統計模式常依據熱輻射強度與暴露時間而定，值得一提的是 BLEVE 所造成的熱輻射通量可高達 200-350 kW/m² 且火球可持續 10-20 秒鐘。

Eisenberg 等提出機率單位方程式(probit equation)用池火與明火的熱劑量來估計對人體所造成傷害的程度。

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln(t_e Q_E^{4/3}) \quad (15)$$

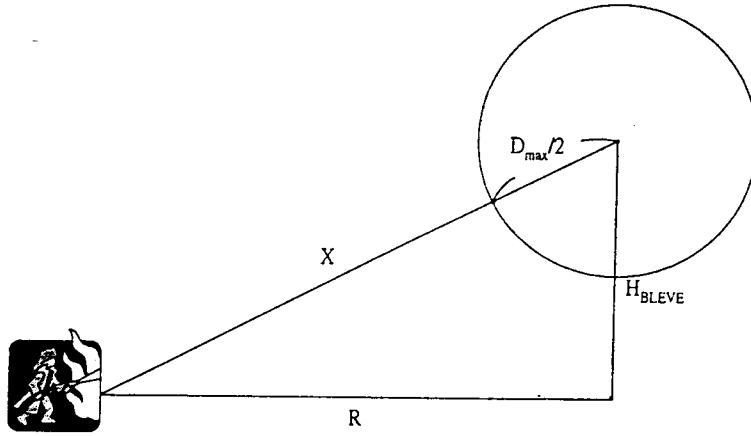


圖 10 評估球槽 BLEVE 之危險半徑示意圖

式中 probit 變量 Y 與致死機率 Pr 有關，可由下式表之：

$$Pr = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (16)$$

雖然上式之積分可在書上查出，但對特定 Y 值仍不方便計算 Pr 。為計算方便，我們將式(16)改寫成誤差函數 (error function) 即：

$$Pr = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (17)$$

通常誤差函數的數值可由電腦計算得知，所以式(17)中只要輸入任意 Y 值即可算出致死機率 Pr ；反之， Pr 已知亦可求出 Y 值。

有許多公式可計算 BLEVE 的物性參數，其中較有用的公式是：

$$\text{最大火球直徑(m): } D_{\max} = 6.48W^{0.325} \quad (18)$$

$$\text{火球持續時間(s): } T_{\text{bleve}} = 0.825W^{0.26} \quad (19)$$

$$\text{火球的中心高度(m): } H_{\text{bleve}} = 0.75D_{\max} \quad (20)$$

$$\text{火球持續時間(s): } T_{bleve} = 0.825W^{0.26} \quad (19)$$

$$\text{火球的中心高度(m): } H_{bleve} = 0.75D_{\max} \quad (20)$$

$$\text{起始地平面火球半圓的直徑(m): } D_{initial} = 0.3D_{\max} \quad (21)$$

BLEVE 發生時，物體接受到熱輻射的量如下：

$$Q_R = \tau_a E F_{21} \quad (22)$$

式中

Q_R : 黑體目標接受的熱輻射量(kW/m²)

τ_a : 穿透率(無因次)

E : 表面放射熱量(kW/m²)

F : 觀察因子(無因次)

注意到大氣穿透率 τ_a ，可用一個包含溼度的相關式計算：

$$\tau_a = 2.02(P_w x)^{-0.09} \quad (23)$$

式中

τ_a : 大氣壓下的穿透率

P_w : 水汽的分壓(Pa)

x : 路徑長度，從火球表面至目標物的距離(m)：

上式之適用範圍為 P_w 與 x 皆不得為零；例如，在 20°C 時，水之蒸氣壓為 2238 Pa(17.5 mmHg)，在 70% 的相對濕度下，水汽分壓為 $P_w = 1636$ Pa，若 x 之距離為 150 m，則 $\tau_a = 0.66$ 。

式 15 中，表面放射量 E 取代了需要火球溫度的 Stefan-Boltzmann 方程式，Roberts 與 Hymes 則提供了一個譜算表面放射熱量的公式：

$$E = \frac{F_{rad} W H_c}{\pi D_{\max}^2 t_{BLEVE}} \quad (24)$$

最後，我們可以計算出火燄表面與接受者之間的路徑距離 x ，可表示成：

$$x = \sqrt{H_{BLEVE}^2 + R^2} - 0.5D_{\max} \quad (26)$$

三、目前進度達成情形

本研究初期評估計 LPG 球型槽之安全，LPG 的成份採 50 vol% 丙與 50 vol% 丁烷的混合物，並藉程序模擬軟體 CHEMCAD III 計算出 LPG 混合物的熱物性質，此模式允許熱物性質隨溫度變化而改變。值得一提的是，熱物性質在不同溫度的數值，採用立方雲規內插法 (cubic interpolatory spline) 求得。

利用適應性的 Runge-Kutta-Fehlberg 演算法，我們將方程式(1)~(13) 寫成 FORTRAN 程式。我們可以改變 BLEVE 的變數以模擬 BLEVE 的現象，這些變數包括外在的熱源、槽體的規格、槽體的灌裝程度。圖 11 及圖 12 為 1000m^3 及 2000m^3 在只受到太陽熱輻射的情況下儲槽各節點的溫度分布。而圖 13 以及圖 14 則是 $1,000\text{m}^3$ 及 $2,000\text{m}^3$ 在受到固定外界熱源以及太陽熱輻射之下儲槽各節點的溫度分布，LPG 槽體的安全界限定為 550°C ，超過這個溫度會導致槽體因金屬張力而破裂。由圖 13 以及圖 14 中都可以看出在有外界固定熱源以及太陽熱輻射的情況下，槽體都有破裂的危險。圖 15 以及圖 16 表示節點 4 在不同的灌裝度下溫度的變化情形，在節點 4 中，其灌裝度越高其溫度上升也越慢，這次因為灌裝度越高者其槽壁與液體接觸的面積越大，因此溫度上升較慢，而節點 1 則反之。圖 17 為槽體在太陽曝曬和固定外界熱源時不同填充度之蒸氣壓。根據 API(1989)，當儲槽火災發生時，外在火燄的高度超過槽內液位是非常危險的。直接暴露於火燄大約經過 10-30 分鐘後，儲槽就會爆裂，而爆裂的確實時間與熱源的強度、暴露於火燄中的槽壁面之厚度有關，這與我們所提之熱效應數學模式的結果是一致的。

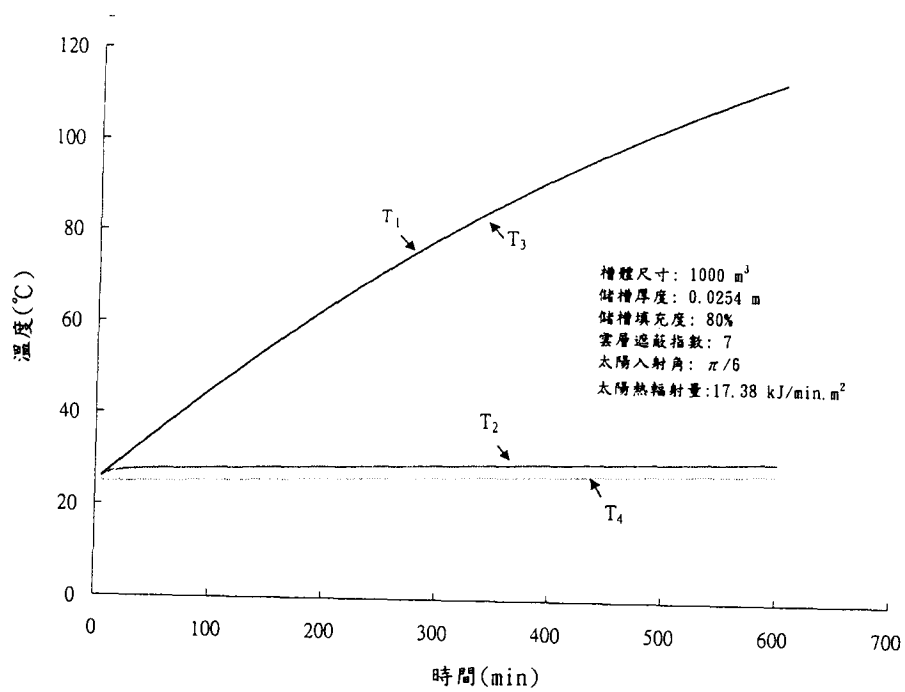


圖 11 $1,000 \text{ m}^3$ 儲槽只受太陽曝曬下槽體各個節點的溫度分布

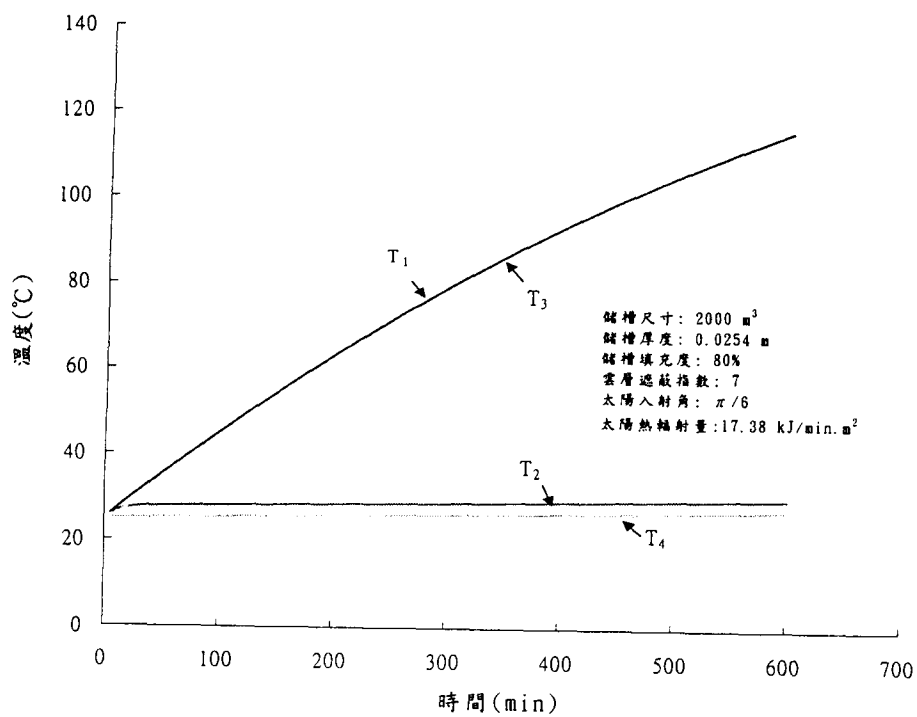


圖 12 $2,000 \text{ m}^3$ 儲槽只受太陽曝曬下槽體各個節點的溫度分布

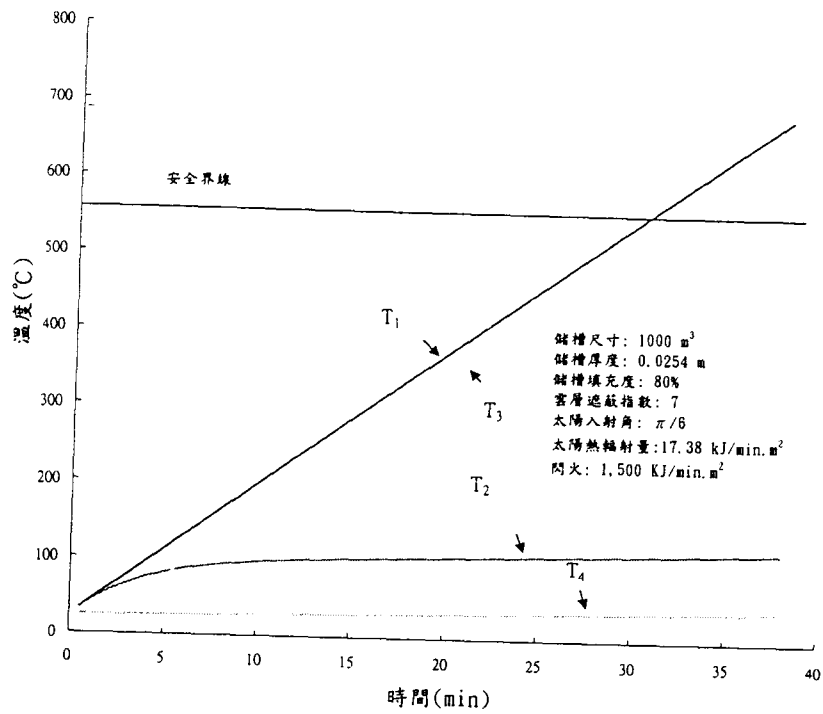


圖 13 1,000 m³ 儲槽在固定外界熱源及太陽曝曬下各個節點的溫度分布

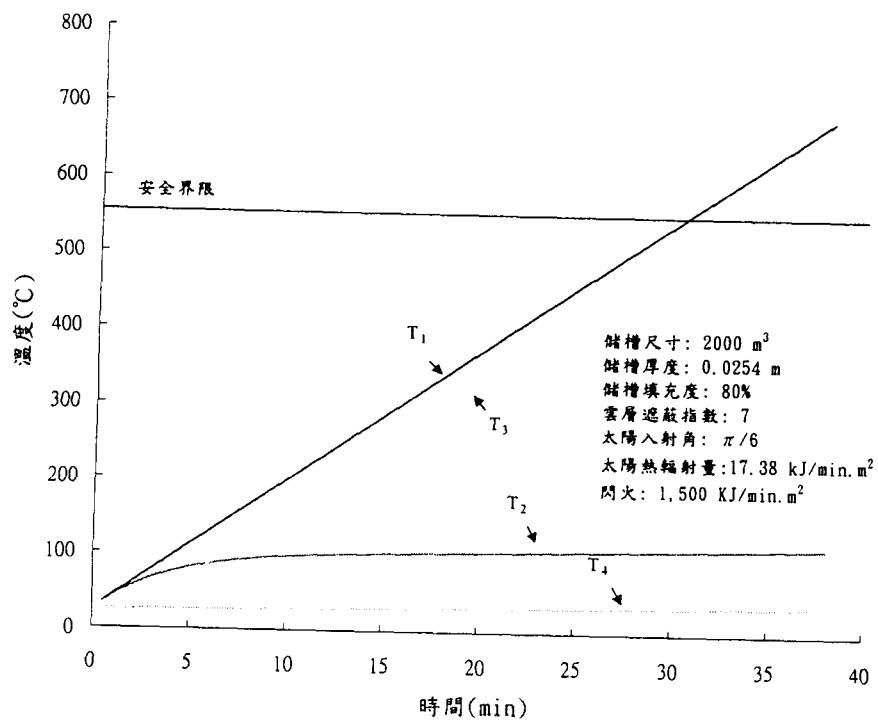


圖 14 2,000 m³ 儲槽在固定外界熱源及太陽曝曬下各個節點的溫度分布

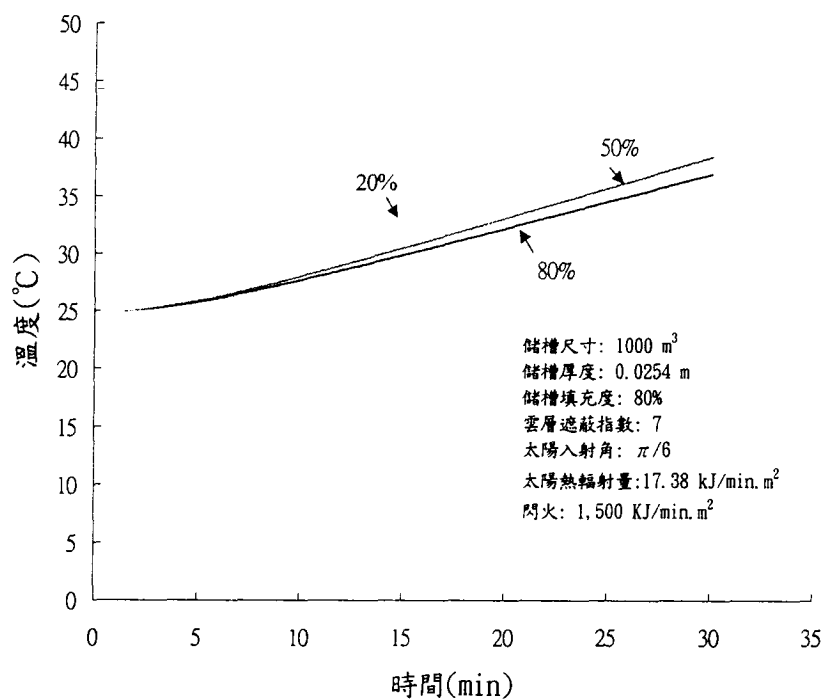


圖 15 1,000 m³ 槽體在不同填充度下節點 4 的變化

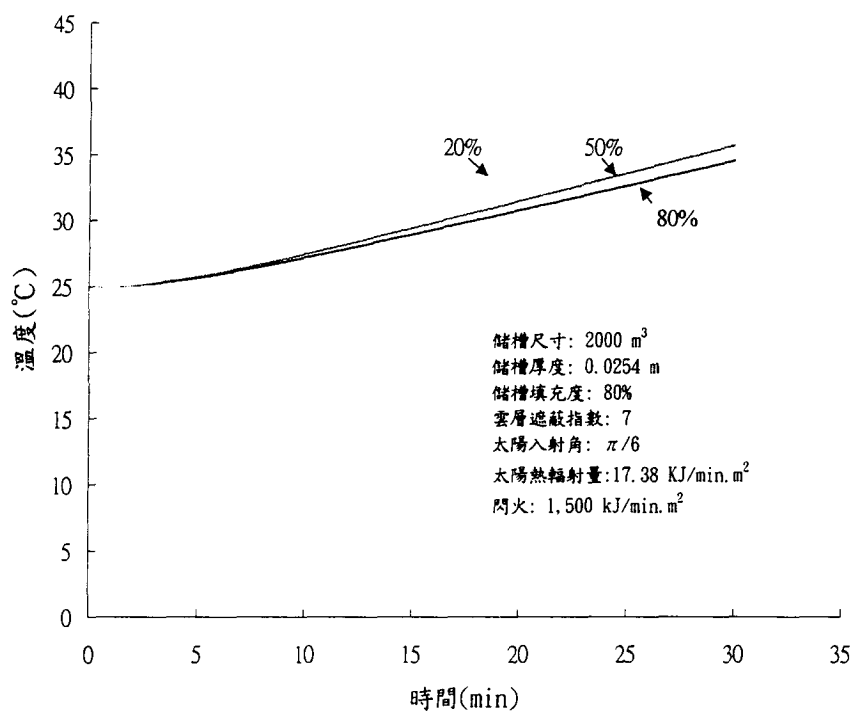


圖 16 2,000 m³ 槽體在不同填充度下節點 4 的變化

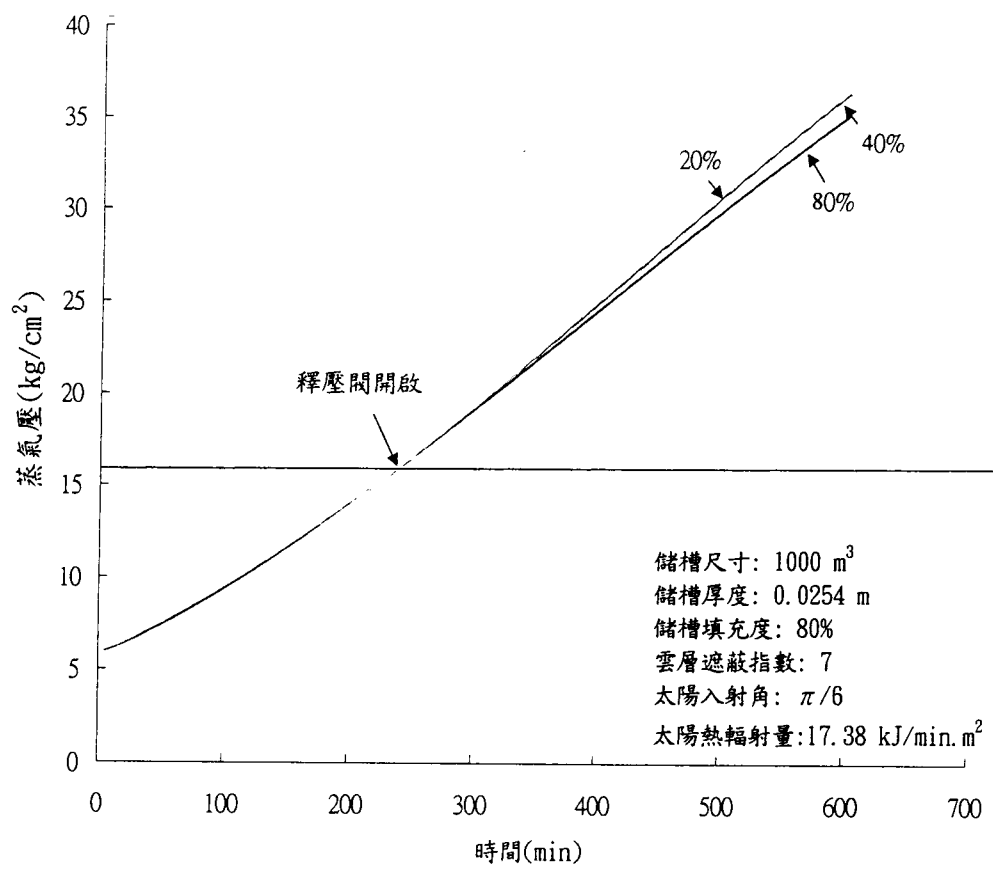


圖 17 槽體在只有太陽曝曬時不同填充度之蒸氣壓

茲以流程圖(圖 18)說明危險範圍的計算過程。首先輸入燃燒液體的質量(w)、燃燒熱(H_c)、輻射分率(F_{rad})、水汽分壓(P_w)與致死機率(P_r)，其次計算 D_{max} 、 t_{BLEVE} 、 H_{BLEVE} 及式 17 中之 Y 值，將式 23、24、25、26 代入式 22，可得危險半徑 R 的代數式，此為非線性方程式的根，需滿足 Q_E 除以 $\tau E F_{21}$ 等於 1 (另註： Q_E 可由式 15 求得，因為 Y 值與 t_e 現為已知，且 t_e 等於 t_{BLEVE})。依以上之計算式，可用電腦程式解出危險半徑，危險半徑即為此半徑所包圍的一個圓形範圍。此危險區域將可提供消防人員救火的參考。

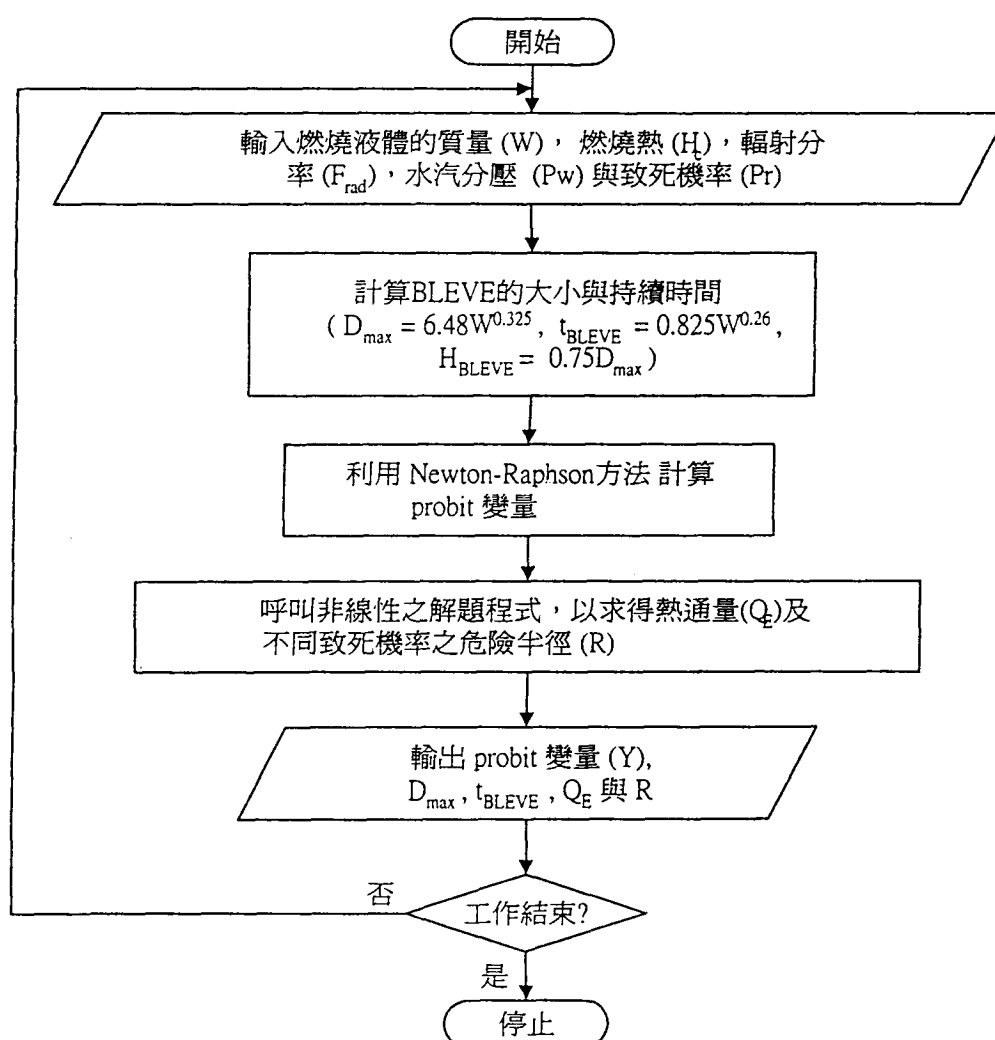


圖 18 評估 BLEVE 危險半徑之流程圖

圖 19 用式 15 與式 17 顯示出致死機率對熱輻射強度與暴露時間的關係。LPG 不同洩露量對危險半徑與致死機率的影響如圖 20 所示，不同洩露量對熱輻射接收量與致死機率的影響如圖 21 所示，從這兩個圖形，可看出危險半徑愈大，致死機率愈小，而熱輻射愈強致死機率愈大。

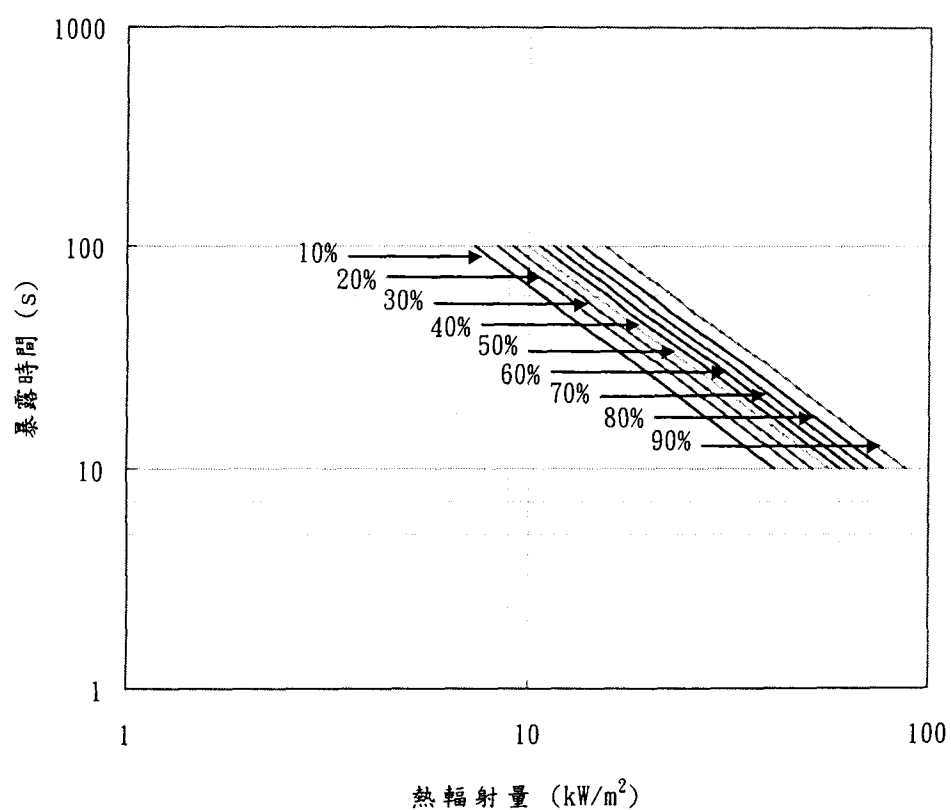


圖 19 熱輻射量與致死機率之關係圖

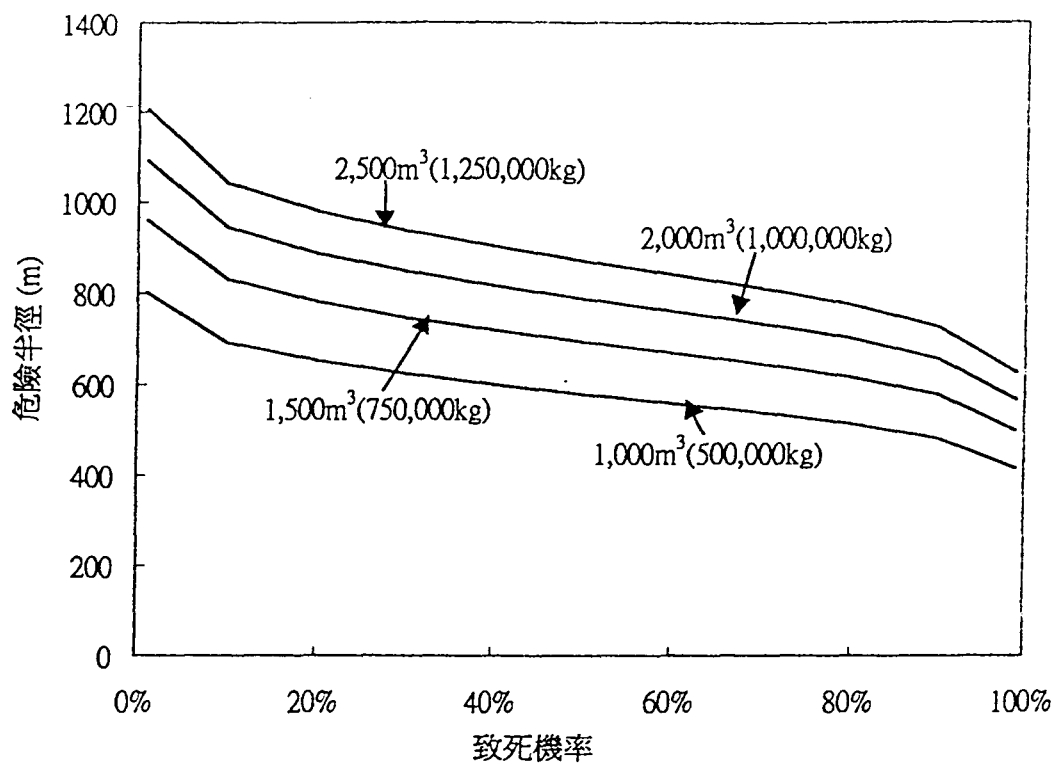


圖 20 不同體積儲槽 BLEVE 後之熱輻射與致死機率/危險半徑之關係

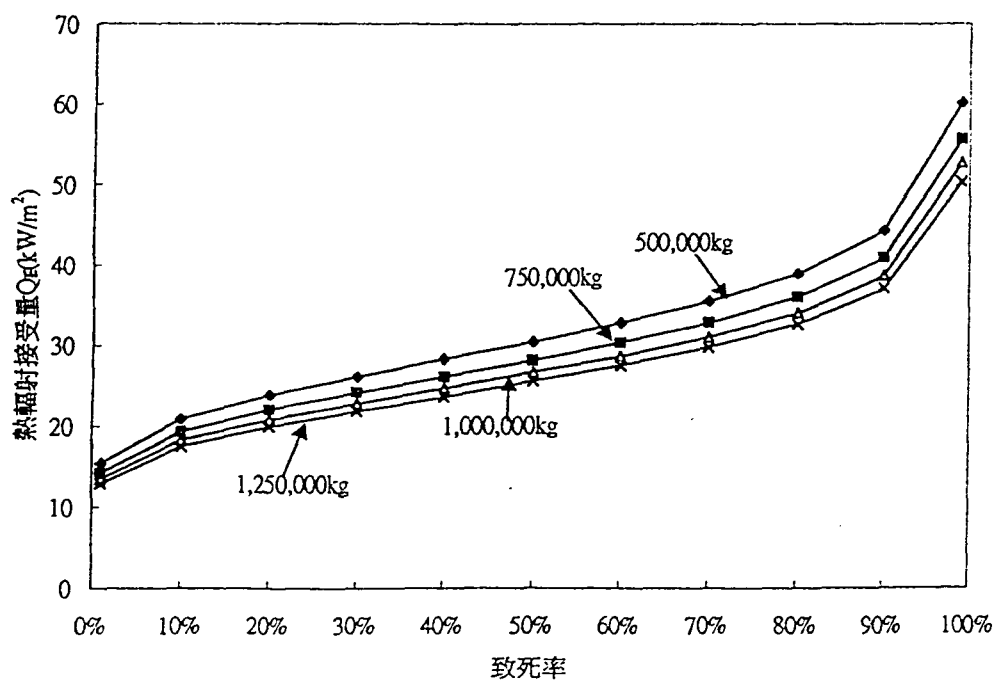


圖 21 不同熱輻射接收量與致死機率的關係

有關 LPG 之法規國內以行政院勞委會「高壓氣體勞工安全規則」為基準，本研另以美國石油學會(API)之法規為參考，將液化石油氣儲槽之設計與建造描述如下：

1. LPG 儲槽的設計與建造

此標準涵蓋液化石油氣在煉油廠、海域接收站、天然氣處理廠、石化工廠、儲槽區、灌裝和卸載系統、消防保護系統及相關裝備的設計、建造與位置。安裝的大小和類型、環境區域(商業區、工業區或人口密集的住宅區)、相關設備的位置、地形和氣候情況也必需審慎考慮。

2. 位置場所

位置的選擇意謂針對儲存設備在火災或爆炸時，使其對鄰近的設備與財產的潛在危險能減至最低。在位置選擇時，下列各項因素需要考慮：

- (1)與居住社區的距離
- (2)與公路的距離
- (3)對鄰近設備的危險性
- (4)儲槽的儲存容量
- (5)對鄰近產業的發展性
- (6)位置的地理與氣候環境，包括海拔和地形坡度
- (7)對緊急狀況的應變
- (8)公共設施的取得
- (9)地區對產物的接收與外送
- (10)地方法律和規章

3. 安全距離

這些標準的特徵趨向於如何避免較大的意外事件。在可燃性氣體洩漏並被點燃時所造成的重大災害中，最小安全距離的存在，將可對鄰近儲槽、裝置、設備所暴露的危險減至最低，並提供適當必要的保護。安全分析(safety analysis)和擴散模式(dispersion model)，在評估安全距離方面為減低對鄰近設備造成災害的有效方法。最小安全距離的需求如下：

- (1) LPG 高壓儲槽與鄰近財產線(shell-property line)之間的最小安全距離，如下表所示：

LPG 高壓儲槽與鄰近財產線(shell-property line)之間的最小安全距離

儲槽的水容量(公升)	最小安全距離(公尺)
7,570-113,550	15.24
113,551-264,950	22.86
264,951-340,650	30.48
340,651-454,200	38.1
大於 454,201	60.96

在對住宅，公共建築物，裝配廠或位於鄰近財產的工業位置，必需提供較大的距離或其他輔助的保護。

- (2) 介於兩 LPG 高壓儲槽或 LPG 高壓儲槽與其他危險可燃性儲槽殼到殼(shell-shell)的最小水平安全距離，必需符合下列各項規定：

A. 介於兩球型儲槽之間、球型與立式儲槽之間或兩

立式儲槽之間的最小安全距離為 1.52 公尺或較大儲槽直徑的一半，選擇一個比較大的數值。

B. 介於兩臥式儲槽之間、臥式與球型或立式儲槽之間的最小安全距離為 1.52 公尺或較大儲槽直徑的四分之三，選擇比較大的那一個數值。

(3) LPG 高壓儲槽與非高壓或易燃的儲槽的最小水平距離必需符合以下各項：

A. 如果另一個儲槽是冷凍儲槽，安全距離為較大直徑中的四分之三。

B. 如果另一個儲槽是常壓儲槽，且所設計儲存的物質其閃火點小於 37.8°C ，安全距離為較大儲槽的直徑。

C. 如果另一個儲槽是常壓儲槽，且所設計儲存的物質其閃火點大於 37.8°C ，安全距離為較大儲槽直徑的一半。

D. 最遠安全距離為 30.48 公尺。

(4) 在 LPG 儲槽的殼邊到建築物之間的最小水平距離如下：

A. 如果建築物用做為儲槽設備的控制之用，安全距離為 15.24 公尺。

B. 如果建築物做為其他目的使用(與儲存體設備的控制無關)，安全距離為 30.48 公尺。

(5) 其它設備與 LPG 槽殼之間的最小水平距離：

A. 製程塔槽，安全距離為 15.24 公尺。

B. 燃燒塔或其他含暴露的火焰的裝備，安全距離為 30.48 公尺。

C. 其他的燃火設備，包括加熱爐和公用鍋爐，安全距離為 15.24 公尺。

D. 轉動裝備，安全距離為 15.24 公尺(除了 LPG 儲槽的吸取幫浦，安全距離為 3.05 公尺)。

E. 電力傳輸線和變電所，安全距離為 15.24 公尺。
除此之外需注意電力傳輸線斷裂時不會掉落在儲槽上。

F. 槽車或火車的灌裝和卸載設備，安全距離為 15.24 公尺。

G. 可航行的航路、碼頭或港口，安全距離為 30.48 公尺。

H. 與固定的內燃機引擎，安全距離為 15.24 公尺。

另外，LPG 槽殼和防液堤的最小水平距離是 3.05 公尺。

依據上述的安全距離規章，我們以台灣常見的標準大型 LPG 儲槽(2,000 公秉)為中心，畫出同心圓的安全距離於圖 22。

4、LPG 高壓儲槽和設備的位置

LPG-高壓儲槽不可置於建築物內，或可燃性液體儲槽及冷凍儲槽可能溢出區域的附近。臥式 LPG 儲槽若容積超過 12,000 加侖(45 公秉)，其所組成的槽區不可超過六個。每個槽區與鄰近槽區之間的殼對殼最小水平距離為 15.24 公尺。

另註：每個臥式儲槽需要定向，長軸端(longitudinal axes)不可指向其它鄰近的儲槽、製程設備、控制室、灌裝或卸載設備及其他可燃或易燃的液體儲存設備。

5、排水

在儲槽地下或周圍需設有排水設備，使溢出的液體能排到安全區域而遠離儲槽，並可防止積水，其傾斜的坡度至少需百分之一。

排水系統用來避免溢出的液體在儲槽下到處流動且能在 LPG 溢出時對管線所造成的危害減至最低。溢出排水區域除了此標準允許之外不能內含其他設備。防火牆、防火堤、渠道或溝流等輔助排水系統可允許在此區域內。

6、防液堤

在儲槽周圍的防液堤用來作為包容溢出物的包含，堤防區域的設計必需依照下述的規定。

- (1) 儲槽下圍處所洩漏或溢出的任何液體需被集中於堤防區域的邊緣，並被導離儲槽與任何管線設備，最小的傾斜坡度至少必需百分之一。

- (2) 若為 LPG 球型儲槽，則每個球體將必需有專屬的

堤防區域。

- (3) 若為 LPG 臥式儲槽，一個槽區只需有一個堤防區域。
- (4) 在堤防區域裡面的滯留量將至少為最大儲槽體積的百分之二十五。假如儲槽所儲存的物質其蒸汽壓在溫度 100°F 時小於 100 psia 時，在堤防區域裡面的滯留量將至少為最大儲槽體積的百分之五十。
- (5) 蒸汽壓由於隨氣候的情況或材質的物理性質而改變，所以堤防區域裡面可能必需提供比上述更大的滯留量。
- (6) 土製防液堤或防液牆需高 0.46 公尺以上，若為水泥、磚塊或其他抗侵蝕材料建造則需 0.31 公尺以上。
- (7) 若防液堤高度高於 1.83 公尺，在防液堤周圍必需預留正常或緊急進出口。
- (8) 若防液堤高度高於 3.66 公尺或自由通風受防液堤限制時，需有能正常操作管閥及攀上槽頂的設施。
- (9) 用來包圍 LPG 儲槽的任何防液堤或防液牆，應有自由通風之設計，並避免未經認可的車輛進出。
- (10) 如果用來包圍 LPG 儲槽的防液堤或防火牆之地面不能在 24 小時內使雨水消散，則必需安裝排水系統。

四、結論與建議

截至目前為止本研究提供一個球形瓦斯儲槽為火燄包圍最糟狀況的熱效應模式，同時亦指出與 BLEVE 相關之熱輻射風險，這些結果對關心 LPG 儲槽安全的人員應有所幫助。此外，此研究發展出的技術尚可應用到其它高壓液化氣(PLG)如乙烯、丁烷、液氮等之安全評估。文中指出 BLEVE 發生時，將造成十分嚴重的災害，由國外爆炸事故統計得知許多 BLEVE 事故是因瓦斯儲槽爆炸所引起的，LPG 是目前國內主要民生用燃料，所以瓦斯儲槽的設計、工廠佈置及安全措施等相關法令規章的訂定是迫切需要的。王安石曾云：「制而用之存乎法，推而行之存乎人」，是法貴能行，但工欲善其事，必先利其器。國內瓦斯儲槽之法規並未建全，本文研究期間蒐集與整理時常覺得有其修改之必要，並提出以下建議以茲參考：

- (1)適用性：國內多為參照日本與美國之相關法規，台灣地狹人稠、天候與地理環境並不與日本與美國相同，法規訂之時需與有關學者專家及現場實地操作人員共同商討，以確保其實用性與有效性。
- (2)整體性：美國石油學會針對 LPG 制定了專屬之法規，而國內「高壓氣體勞工安全規則」中並無明確顯示，當以整體性與系統性的編輯，檢索時才

不至於誤漏以達清晰連貫。

- (3)簡明性：隨社會的進步、工廠的林立與環境的變遷，法規內容更趨複雜，是故減少法規繁雜，以利擷取時發揮其實效有其必要性。

根據以往的經驗，高壓 LPG 儲槽火災不但嚴重且難以控制並常波及其他設備與人員的安全，更損害儲槽本身，故評估儲槽保護安全措施實為政府與事業單位最需重視之計畫。認為有關 LPG 儲槽之設計基準與系統規劃應含：

- (1)設計對每一球槽表面噴灑 7 l/min.m^2 之消防灑水裝置。
- (2)設計對每一球槽由槽頂至槽底 6 圈灑水環。
- (3)設計球槽最上圈之灑水環同時可作為平時冷卻球槽之用，其噴灑量 2 l/min.m^2 。
- (4)採自動感應火災之設計，採噴洪閥系統(water deluge system)作動，每座球槽一組。
- (5)設計每座球槽至少有三組固定式消防栓作為輔助消防之用。
- (6)設計每一球槽火災警告訊號接至控制室火警受信總機。
- (7)設計每一座球槽有漏氣自動警報系統。
- (8)槽體上之安全閥出口裝置滅焰器不宜直接排大氣。

高壓氣體儲槽除了球型槽外，目前先進國家如德國於 1959 年首次採用 30 套 200 m³ 覆土式壓力儲槽(earth covered tank)，1971 年應用於儲存 LPG、Propane 等高壓常溫液化石油氣。基於安全理由，德國計劃 1,000 m³ 以上之球型槽，禁止發照，法國則禁止 500 m³ 以上球型槽建造。目前國外使用覆土式壓力儲槽有：BASF、Deutsche Shell、Esso、Mobil Oil、Bayer 等公司，共超過 200 套，國內台塑企業自德國引進此技術，於六輕廠區建造 92 套供碼槽區、煉油、石化製造區使用。以覆土式壓力儲槽取代目前的球型槽或可當作中油公司的參考。

本研究之後續工作將進行包覆保冷材料之球型槽(如乙烯)的安全評估並探討高壓液化儲槽火災爆炸控制策略。

五、參考文獻

- (1) Garrison, W.G., 1986; "One Hundred Largest Losses-A Thirty-year Review of Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries - Ninth Edition," M&M Protection Consultants, Chicago, Ill.
- (2) Walls, W.L., 1978; "Just What Is A BLEVE," *Fire Journal*, National Fire Protection Association, Mass.:46-47.
- (3) Prugh, R.W., 1991; "Quantify BLEVE Hazards," *Chem. Eng. Prog.*, (2):66-72.
- (4) Pietersen, C.M., and Huerta, S.C., 1985; "Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, 19 Nov. 1984", TNO Report B4-0222, P. O. Box 342, 7300 AH, Apeldoorn, The Netherlands.
- (5) Birk, A.M., and Cunningham, M.H., 1994; "The Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, 7(6): 474-480.
- (6) Birk, A.M., 1995; "Scale Effects with Fire Exposure of Pressure-Liquefied Gas Tanks," *J. Loss Prev. Process Ind.*, (8): 275-290 .
- (7) Shebeko, Yn.N., et al., 1996; "BLEVE Prevention Using Vent Devices," *J. Hazardous Mat.*, (50):227-238.
- (8) Ramskill, P.K., 1988; "A Description of the ENGULF Computer Code," *J. Hazardous Mat.*, (20):177-196.
- (9) Beynon, G.V., et al., 1988; "Fire Engulment of LPG Tanks: HEATUP, A Predictive Model," *J. Hazardous Mat.*, (20):227-237.
- (10) Holman, J.P., 1992; "*Heat Transfer*," 7th ed. In SI units, McGraw-Hill, New York: 354.

- [11] Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., 1992; "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*," Prentice Hall, New Jersey: 636.
- [12] Mills, A.F., 1992; "*Heat Transfer*," Prentice Hall, New Jersey: 636.
- [13] McAdams, W.H., 1954; "*Heat Transmission*," 3rd ed., McGraw-Hill, New York: 244.
- [14] Crowl, D.A., and Louvar, J.F., 1990; "*Chemical Process safety: Fundamentals with Applications*," Prentice Hall, New Jersey: 37, 64.
- [15] Chen, J.R., et al., 1995; "Thermal Radiation Hazard of Storage Tank Fires and Its Relation to Tank-to-Tank Spacing," Paper Presented at the 2nd Intl. Conf. And Exhib. On Loss Prev. in the Oil, Chem. Process Ind., Singapore: 84-89.
- [16] Robertson, R.B., 1976; "*I. Chem. E. Symp. Ser.*," (47): 157.
- [17] Crocker, W.P., and Napier, D.H., 1986; "Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires," *I. Chem. E. Symp. Ser.* (97): 159-183.
- [18] Thomas, P.H., 1963; "9th Int'l Symposium on Combustion," Academic Press, New York: 844.
- [19] Hardee, H.C., and Lee, D.J., 1977; "A Simple Conduction Model for Skin Burns Resulting from Exposure to Chemical Fireballs," *Fire Research*, (1): 199-205.
- [20] Eisenberg, N.A., et al., 1975; "Vulnerability Model-A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills," U.S. Coast Guard, Office of Research and Development, Report No. CG-D-136-75, NTISAD-015-245, Springfield, VA.

- [21] AIChE/CCPS, 1989; "*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*," Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York: 126.
- [22] Pietersen, C.M., 1988; "Analysis of the LPG-Disaster in Mexico City," *J. Hazardous Mat.*, (20): 85-107.
- [23] Roberts, A.F., 1981; "Thermal Radiation Hazards from Releases of LPG from Pressurized Storage," *Fire Safety J.*, 4(3): 197-212.
- [24] Hymes, I., 1983; "The Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation," UKAEA Safety and Reliability Directorate, Report SRD R275, Culcheth, UK.
- [25] API, 1989; "Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of LPG Storage Facilities," 2510A.
- [26] API, 1995; "Design and Construction of LPG Installation," 2510.
- [27] Burden, R.L., and Faires, J.D., 1993; "*Numerical Analysis*," PWS-Kent Publishing Company, Boston, Mass: 266-267.